

Будзинский М.¹, д.ф.-м.н., директор института физики,
Вальков В.И.², д.ф.-м.н., зав. отделом, Митюк В.И.³, к.ф.-м.н.,
ст. н. с., Суворец З.¹, к.ф.-м.н., доцент, Ткаченко Т.М.⁴ к.ф.-м. н.,
доцент.

¹ *Институт Физики, Университет М.Кюри-Склодовской,
Люблин, Польша.*

² *Донецкий Физико-Технический ин-т НАН Украины
им. А.А.Галкина, Донецк, Украина*

³ *ГО "НПЦ НАН Беларуси по материаловедению", Минск,
Беларусь*

⁴ *УО «Белорусский государственный аграрный технический
университет», Минск, Республика Беларусь*

MnNiFeGe – МАТЕРИАЛ ДЛЯ МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Ключевые слова. Магнитокалорический эффект, сплав MnNiFeGe, эффект Мессбауэра.

Аннотация. В работе проведено исследование структуры, магнитных и мессбауэровских свойств системы твердых растворов $MnNi_{1-x}Fe_xGe$ в области составов $0.10 \leq x \leq 0.25$. Показано, что в области температур от 70К до температуры незначительно ниже комнатной (магнитного фазового перехода T_C) изученные сплавы - ферромагнетики. Магнитные характеристики сплавов от характера термообработки практически не зависят. Предложена картина распределения атомов металлов по подрешеткам.

В результате практической деятельности человека происходит истощением природных энергоресурсов. Поэтому поиск, изучение и последующее использование новых источников и преобразователей энергии относятся к наиболее актуальным проблемам современности. Для многих отраслей современной техники интерес может представлять устройство, в котором воздействием магнитного поля на материал (рабочее тело) можно его разогреть (либо охладить). В основе такого преобразования магнитной энергии в тепловую и наоборот лежат прямой и обратный магнитокалорический эффект. Идея создания холодильных машин на основе этого эффекта дала толчок к исследованию свойств группы подходящих материалов, в том числе $MnNi_{1-x}Fe_xGe$ [1].

Структурные и магнитные свойства тройных соединений MnFeGe и MnNiGe изучены ранее, [2-3]. Но электронная структура четырех-компонентной системы MnNiFeGe в зависимости от содержания и распределения 3d компонент, заполнения 3d зон MnNi_{1-x}Fe_xGe практически не изучена. В работе проведено исследование структуры, магнитных и мессбауэровских свойств системы твердых растворов MnNi_{1-x}Fe_xGe в области составов 0.10 ≤ x ≤ 0.25.

Образцы MnNi_{1-x}Fe_xGe четырех различных составов получены из расплава гомогенных смесей порошков чистотой не ниже 99,99% в атмосфере аргона с последующей закалкой на колесо, вращающееся с линейной скоростью 20 мм×с⁻¹. Часть полученных образцов каждого состава затем отжигали при температуре T=850°C в течение 6 часов. Рентгенографический фазовый анализ на порошках полученных образцов, выполненный в CuK_α-излучении, показал, что все полученные твердые растворы MnNi_{1-x}Fe_xGe кристаллизовались в гексагональную структуру типа Ni₂In.

Измерения удельных намагниченностей твердых растворов MnNi_{1-x}Fe_xGe, 0.10 ≤ x ≤ 0.25, проведены по методу Фарадея в поле 0.86 Тл и интервале температур 77K ≤ T ≤ 500K. Температуры Кюри определены экстраполяцией линейной части кривой температурной зависимости квадрата удельной намагниченности к оси температур, таблица 1.

Для уточнения характера распределения атомов металла по подрешеткам, были проведены мессбауэровские исследования полученных твердых растворов MnNi_{1-x}Fe_xGe, 0.10 ≤ x ≤ 0.25. Эксперимент проведен в обычной геометрии прохождения, режиме постоянных ускорений с использованием источника резонансного излучения ⁵⁷Fe/Rh, ширина линии которого составляла 0.11 мм/с. Температуры поглотителя составляли 77K (температура жидкого азота) и 290K (комнатная).

Таблица 1. Магнитные характеристики твердых растворов MnNi_{1-x}Fe_xGe, 0.10 ≤ x ≤ 0.25.

| № | Состав | Способ обработки | T _C , K | σ, Г×см ³ ×г ⁻¹ |
|---|--|--------------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| 1 | MnNi _{0.75} Fe _{0.25} Ge | Закалка на колесо | 234 | 67.60 |
| 2 | MnNi _{0.8} Fe _{0.2} Ge | Закалка | 232 | 63.68 |
| 3 | MnNi _{0.85} Fe _{0.15} Ge | Закалка | 220 | 62.86 |
| 4 | MnNi _{0.9} Fe _{0.1} Ge | Закалка | 218 | 56.73 |
| 5 | MnNi _{0.75} Fe _{0.25} Ge | Закалка + отжиг (T=850C, t=6ч) | 232 | 65.18 |
| 6 | MnNi _{0.80} Fe _{0.20} Ge | Закалка + отжиг | 230 | 65.95 |
| 7 | MnNi _{0.85} Fe _{0.15} Ge | Закалка + отжиг | 219 | 59.61 |
| 8 | MnNi _{0.9} Fe _{0.1} Ge | Закалка + отжиг | 295 | 10.93 |

По характеру температурной зависимости удельной намагниченности, образцы всех изученных составов $MnNi_{1-x}Fe_xGe$, $0.10 \leq x \leq 0.25$, относятся к ферромагнетикам. Переходов типа антиферромагнетик–ферромагнетик не обнаружено, какой–либо значительной зависимости магнитных свойств от способа термообработки сплавов также не выявлено. Величины удельных намагниченностей и температур Кюри для образцов одного состава, но с различными термообработками – закалкой (i) и закалкой с отжигом (ii) – различаются слабо. Дополнительный отжиг незначительно снижает (не более чем на 2emu/g) удельную намагниченность и также на $\sim 1\text{--}2^\circ$ температуру Кюри. Незначительное снижение магнитных параметров при отжиге образцов может быть связано с особенностями структуры типа Ni_2In .

Данные мессбауэровских измерений помогают уточнить картину распределения атомов металлов по подрешеткам. Совокупность полученных магнитометрических и мессбауэровских данных свидетельствует о том, что в $MnNi_{1-x}Fe_xGe$, при содержании железа $x=0.10\div 0.15$ атомы железа статистически распределены по обеим структурным подрешеткам: октаэдрической (MeI) и тригонально-бипирамидальной (MeII). С ростом содержания железа ($x>0.15$) в подрешетке MeII содержание железа остается практически постоянным, а железо сверх этой концентрации замещает только марганец в позициях MeI.

Заключение.

Все изученные сплавы однофазными твердыми растворами с гексагональной структурой типа Ni_2In . В области температур от 70К до температур магнитного фазового перехода изученные твердые растворы представляют собой ферромагнетики. Магнитные характеристики закаленных и отожженных образцов от характера термообработки практически не зависят.

Показано, что в $MnNi_{1-x}Fe_xGe$, $0.10 \leq x \leq 0.15$, при $x \sim 0.10\text{--}0.15$ железо статистически распределяется по двум типам структурно неэквивалентных позиций металла. При наращивании содержания $x>0.15$, железо замещает марганец в октаэдрических позициях. Никель в тригонально-бипирамидальных позициях железом не замещается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ekkehard Hubertus Brück. Material for magnetic refrigeration preparation and application / Ekkehard Hubertus Brück, Ojiyed Tegusi, Frank Roelof De Boer // US Patent, 2004 - № 7069729 B2.
2. Zhang Cheng-Liang. Magnetic phase transitions and magnetocaloric effect in the Fe-doped MnNiGe alloys / Zhang Cheng-Liang, Wang Dun-Hui, Chen Jian, Wang Ting-Zhi, Xie Guang-Xi and Zhu Chun // Chin. Phys. B. - 2011- 20- 097501. DOI: [http:// iopscience.iop.org/ 1674-1056/20/9/097501](http://iopscience.iop.org/1674-1056/20/9/097501)
3. A.D. Bruce. Structural phase transitions (Monographs on physics) /A.D. Bruce, R.A. Cowley – Published by Taylor and Francis, 1981 - 326p.
4. G.K. Wertheim Anisotropic hfs Interactions in Ferromagnets from Mössbauer Effect Studies./ G.K. Wertheim, V. Jaccarino and J.H. Wernick // Phys. Rev. -1964- 135- A151-A154.
5. М. Будзинский, Структура и свойства $\text{MnNi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$, $0.10 \leq x \leq 0.25$. / М. Будзинский, В.И. Вальков, А.В. Головчан, В.И. Митюк, З. Суровец , Т.М. Ткаченко // Физика твердого тела.- 2015-57- С.2339-2344.

**Бутько А.А., Пашинский В.А., Ковшик В.В.,
Белорусский государственный университет, МГЭИ
им. А.Д. Сахарова, г. Минск, Республика Беларусь**

ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСТУПЛЕНИЯ СУТОЧНЫХ СУММ ПРЯМОЙ И РАССЕЯННОЙ РАДИАЦИИ

В мировой практике используется ряд эмпирических моделей позволяющих на основании месячных данных поступления суммарной солнечной радиации рассчитать приход прямой и рассеянной радиации, среди которых можно выделить модели Колларес-Перейры, Рэйбла и др.

Сопоставляя полученные результаты моделирования с фактическими измеренными значениями поступления рассеянной солнечной радиации, показало, что предложенные модели не являются приемлемыми для территории Беларуси. Данное несоответствие обуславливается рядом факторов, таких как: различие измеритель-